

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

D'où vient le « chemish » ?

Dehon, Jérémy; Snauwaert, Philippe

Published in:
Chimie nouvelle

Publication date:
2018

Document Version
Version revue par les pairs

[Link to publication](#)

Citation for pulished version (HARVARD):

Dehon, J & Snauwaert, P 2018, 'D'où vient le « chemish » ? Étude de la langue symbolique chimique comme un miroir des avancées théoriques et expérimentales des chimistes dans l'histoire', *Chimie nouvelle*, Numéro 129, p. 11-31.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

D'où vient le « chemish » ?

Étude de la langue symbolique chimique comme un miroir des avancées théoriques et expérimentales des chimistes dans l'histoire

Jérémy Dehon

Université de Namur - Unité recherche en didactique de la chimie (rue de Bruxelles 61, B-5000 Namur, Belgique) – jeremy.dehon@unamur.be

Philippe Snauwaert

Université de Namur - Unité de recherche en didactique de la chimie (rue de Bruxelles 61, B-5000 Namur, Belgique) – philippe.snauwaert@unamur.be

Cet article est issu en grande partie d'un chapitre de la thèse de J. Dehon (2018).

« Créer une science n'est donc autre chose que faire une langue. »

(Condillac, 1798, p. 288)

1. INTRODUCTION

La phrase de Condillac est bien connue : elle fait l'objet de nombreuses citations dans des ouvrages traitant de l'histoire des sciences, et plus particulièrement de l'évolution des langues en sciences (Dagognet, 1969 ; Laszlo, 1993). Cependant, rares sont ceux qui citent la suite du propos du philosophe français : « [...] et étudier une science n'est autre chose qu'apprendre une langue bien faite » (Condillac, 1798, p. 228). Nous nous permettons même d'inverser la proposition de Condillac en arguant que l'étude de la langue permet d'apprendre la science.

Ce détour par l'apprentissage des sciences, et donc des langues qui leur sont dédiées, est un must pour qui s'intéresse à l'évolution des codes employés par les chimistes pour se faire comprendre par leurs pairs, et par extension par la société civile. Celle-ci s'en empare, utilisant une formule chimique pour nommer une société (« O₂ » est une société de services à domicile française, « H₂O » est une entreprise de consultance, etc.), usant d'un terme de nomenclature comme titre de roman (« acide sulfurique » d'Amélie Nothomb), comme titre de série (« Altered carbon ») ou comme nom d'entreprise (« Hélium » est le nom d'une maison d'éditions), etc. Le langage utilisé par les chimistes est ainsi exprimé tant dans la communauté des initiés que dans une communauté plus large, avec – bien entendu – des buts différents.

Mais une personne se référant au « langage de la chimie » implique-t-elle tacitement la nomenclature des substances, les formules et équations chimiques, les relations mathématiques, les noms et schémas d'appareillages et/ou les représentations moléculaires de type Cram ou Fischer ? Il semble en effet plus correct de parler *des* langages de la chimie que

du langage de la chimie. Le « chimique » (« *chemish* », Markic & Childs, 2016) cache ainsi un conglomérat de systèmes sémiotiques¹ en interaction.

Une taxonomie des systèmes sémiotiques (figure 1) a été développée dans le but de clarifier d'une part les langues et codes employés par les chimistes, et d'autre part préciser les liens entre ces systèmes, du point de vue de l'apprentissage par des élèves débutants (Dehon, 2018).

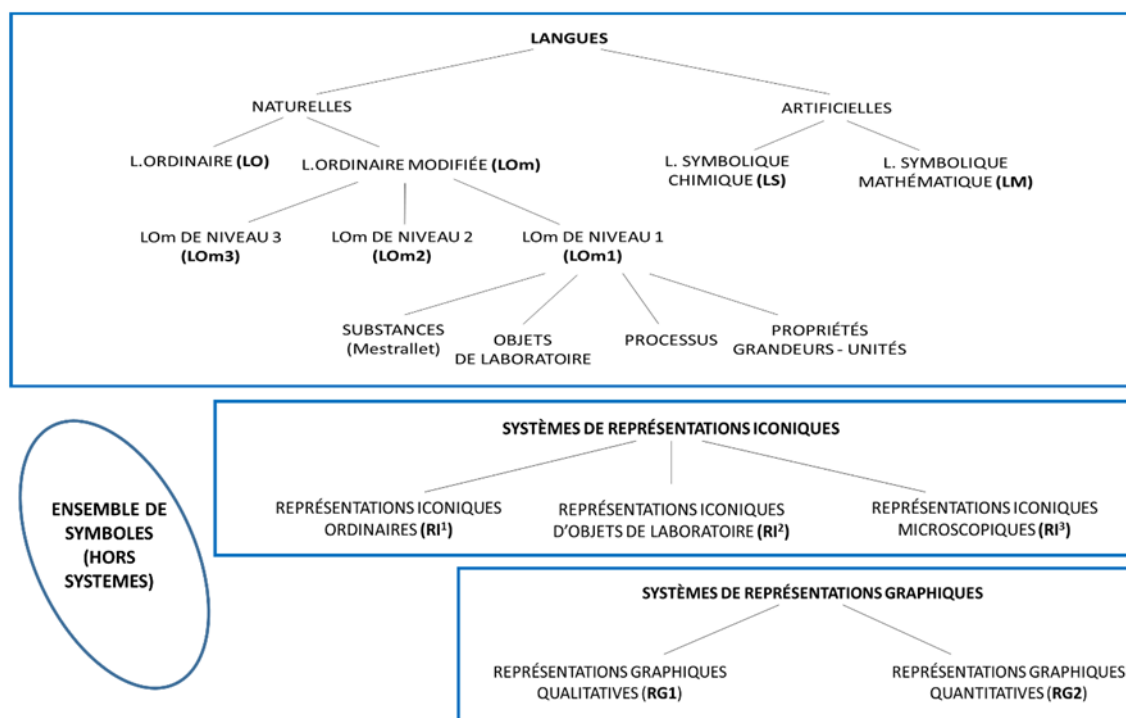


Figure 1. Taxonomie des systèmes sémiotiques de l'écrit et de l'oral à l'œuvre dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.

Selon cette taxonomie, le « chimique » est composé de langues naturelles (langue ordinaire et langue de spécialité chimique, incluant notamment les termes de la nomenclature des substances), de langues artificielles² (symbolique chimique, symbolique mathématique), ainsi que de multiples registres de représentations iconiques³ et graphiques. Dans cet article, nous allons nous focaliser sur la langue symbolique chimique, en tant que langue artificielle créée par les chimistes dans le but de représenter et communiquer les concepts nés de leurs découvertes. Nous allons tenter de montrer comment la symbolique chimique s'est construite en fonction des intentions des différents contributeurs qui ont jalonné son histoire. Nous allons aussi interroger les significations cachées, les irrégularités gommées par le temps, mais qui sont

¹ Les systèmes sémiotiques sont des systèmes de signes. Les signes sont diversement définis, notamment selon l'intentionnalité ou non de la communication. Ainsi, les signes ayant pour fonction première de transmettre volontairement du sens sont appelés signaux. Parmi les signaux, on trouve les signes linguistiques, les signes non linguistiques, les symboles et les icônes (Dubois et al., 2012). Plus généralement, un signe peut être considéré comme « quelque chose qui est mis à la place de quelque chose d'autre » (Eco, 1988).

² Une langue artificielle est une pure construction logique, à la manière de l'espéranto.

³ L'icône est définie comme un signe artificiel qui a pour propriété d'imiter de manière perceptible ce à quoi il réfère (Prieto, 1968).

pourtant nécessaires pour comprendre pleinement les informations convoyées par ces simples lettres, ces simples chiffres, qui composent la symbolique chimique.

Nous posons dès lors la question suivante : en quoi l'élaboration de la symbolique chimique est-elle reliée aux concepts forgés par les chimistes au cours de l'histoire de la discipline ? Plus particulièrement, nous décrirons les informations conservées et, surtout, les informations perdues en cours de route, non-conservées par l'usage qu'en ont fait les chimistes.

Pour répondre à cette question, il faut plonger dans les archives de la discipline. Il s'agit de se promener à nouveau, avec un regard renouvelé, dans « cette sorte de musée qui sans cesse renvoie le chimiste d'aujourd'hui, de façon subliminale, à un climat symbolique toujours actif. » (Edeline, 2009, p. 45).

2. POINTS DE VUE ÉPISTÉMOLOGIQUES

L'histoire de la langue symbolique chimique, et plus généralement des systèmes sémiotiques construits par les chimistes, peut être envisagée selon plusieurs points de vue, mais toujours en suivant des lignes de faille, des ruptures.

Edeline (2009) s'est ainsi intéressé au **type de signes** convoqué dans les systèmes sémiotiques dominants selon les époques, mettant en évidence un aller-retour entre icône et symbole. L'icône alchimique cède le pas au symbole de Berzelius, qui lui-même se fait dépasser par les représentations iconico-symboliques telles que les représentations de Cram ou les projections de Newman.

Pour développer leur analyse épistémologique de la langue symbolique des chimistes, d'autres auteurs, comme Liu et Taber (2016), se basent sur les **besoins rencontrés par les scientifiques** dans leurs pratiques. En utilisant le cadre théorique de la sémiotique sociale, ils interprètent les signes comme des ressources sémiotiques que les chimistes utilisent pour agir sur la réalité. En ce sens, l'émergence de la nomenclature de Lavoisier est une réponse à des besoins sociétaux tels que l'enseignement des sciences au plus grand nombre.

En plus de ces ruptures sociétales et techniques, Dagognet (1969) propose **un point de vue plus langagier** sur l'épistémologie des langages en chimie. Ainsi la nomenclature de Lavoisier est-elle qualifiée de « physico-grammaticale » ou encore de « voco-structurale », laissant entendre que la grammaire de la langue des chimistes doit être un miroir de la grammaire de la nature. Cet ensemble sera vite dépassé par l'apparition de la chimie « scripturale et géométrique » qui, nous le verrons, ne sera pas en mesure d'enterrer son ancêtre voco-structural.

Enfin, il est également possible, comme Laugier et Dumon (2004) d'envisager une lecture de l'histoire des systèmes sémiotiques en chimie, en faisant référence à l'**échelle convoquée**. Avec sa nomenclature et sa première équation de réaction, Lavoisier connecte un niveau macroscopique (noms des substances, conservation de la masse) à une première écriture de nature symbolique. Il faudra attendre Dalton et Berzelius pour que le niveau symbolique soit également relié à un niveau plus microscopique ou « atomico-moléculaire ».

Ces différents points de vue vont nous permettre de retracer, de manière chronologique, l'histoire de l'origine des symboles utilisés par les chimistes, ainsi que de l'évolution des modifications apportées par les différents contributeurs. Nous adoptons ici une trame chronologique classique, qui épouse finalement assez bien les sinuosités de ce long fleuve (très peu) tranquille qu'est l'histoire de la symbolique chimique.

3. DE L'ICÔNE ALCHIMIQUE AUX FLÈCHES DE RÉACTION

3.1. L'icône alchimique

Dans son article sur les fonctions des symboles chimiques, Edeline (2009) souligne l'importance de l'héritage que nous ont laissé les alchimistes, notamment européens. Il pourfend l'idée d'une alchimie vue comme une « illusion désolante », une « énorme supercherie » (Edeline, 2009, p. 46). Au contraire, l'alchimie se base sur des principes qui ne s'avèrent guère éloignés des principes scientifiques contemporains, comme les principes d'unité, de simplicité ou de correspondance, sur lesquels nous reviendrons. La différence notable avec la science contemporaine réside dans la primauté de l'image, la confiance en un signe représentant l'équivalent magique du signifié. Nul besoin de mots complexes quand l'image parle d'elle-même, quand le signe (ici, iconique) contient les informations nécessaires et suffisantes à sa pleine compréhension⁴.

3.1.1. Symboles, icônes et hybrides

Les alchimistes disposent de trois groupes de signes : pour les appareils (à dominante iconique), pour les opérations (symbolico-iconiques) et pour les substances (essentiellement symboliques). Le signe représentant l'appareil a pour vocation de lui ressembler, d'en saisir les caractéristiques les plus importantes (figure 2).



Figure 2. Quelques icônes alchimiques représentant des appareils (Edeline, 2009).

L'opération, intrinsèquement dynamique, doit pourtant être représentée par un signe fixe, souvent à mi-chemin entre l'icône et le symbole (figure 3).

Par exemple, la calcination est représentée par un cercle au centre d'un triangle : le cercle figure le résidu de la calcination (partie iconique) quand le triangle est le signe alchimique du feu (partie symbolique).

⁴ Edeline cite l'exemple frappant du *Mutus Liber*, ouvrage alchimique du XVII^{ème} siècle, qui offre la particularité de n'être composé que d'images, sans aucun mot de commentaire ou d'introduction.

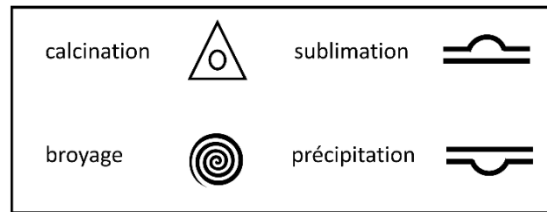


Figure 3. Quelques signes alchimiques représentant des opérations (Edeline, 2009).

Enfin, les signes représentant les substances sont très majoritairement de nature symbolique, de par la difficulté de rendre compte de l'état liquide, de l'état gazeux, du solide poudreux, etc. Les alchimistes ont donc préféré forger des conventions arbitraires entre les substances et leurs symboles (figure 4).

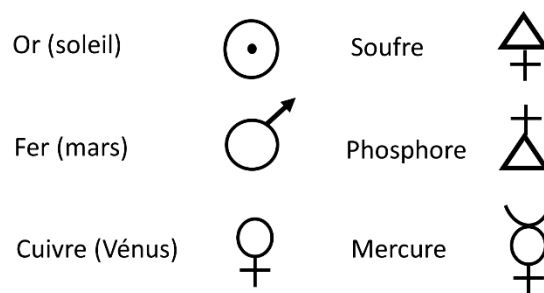


Figure 4. Quelques symboles alchimiques représentant des substances (Edeline, 2009).

Ces signes graphiques sont toujours préférés aux lettres de l'alphabet, jugées trop peu signifiantes. Ils doivent en effet jouer plusieurs rôles qui nécessitent des formes graphiques particulières :

- Le symbole sert de moyen mnémotechnique ou d'abréviation. Par exemple, la correspondance entre le cuivre et son symbole passe par l'intermédiaire de la déesse Vénus. Le miroir est ici le symbole à la fois de la féminité, de la déesse Vénus, de la planète Vénus et de la substance « cuivre ». Les alchimistes ont ainsi parfois recours à une part iconique dans leurs représentations des substances (miroir, lune, fleur, soleil, etc.) pour favoriser la mémorisation de celles-ci.
- Le symbole doit rendre compte des relations que la substance entretient avec d'autres substances ou avec les quatre éléments, plutôt que des propriétés de la substance elle-même. Le phosphore et le soufre sont ainsi tous deux liés au feu (triangle orienté vers le haut)⁵, ce qui leur confère une parenté (figure 4).
- Le symbole doit rappeler visuellement la théorie anthropocosmique qui supporte l'activité des alchimistes. La correspondance entre les planètes et les métaux est une caractéristique essentielle de la nomenclature alchimique, tendant à projeter

⁵ Le phosphore est bien entendu lié à la lumière (donc, associé au feu), alors que le soufre est considéré par les alchimistes comme un agent particulièrement actif. Sa couleur jaune renvoie à celle du feu et du soleil.

l'arrangement cosmique sur la composition de la matière, tout en prêtant des qualités humaines tant aux substances qu'aux planètes. Le mercure est, par exemple, jugé féminin et passif, alors que le soufre est décrit comme masculin et actif.

De telles contraintes sémantiques ne pouvaient faire l'objet de consensus stricts à l'époque des alchimistes. Il en résulte une absence d'univocité dans les représentations des unités de la matière : plusieurs symboles sont utilisés pour décrire une même substance (figure 5).



Figure 5. Quelques symboles alchimiques représentant la substance zinc.

Ce fait entrave la communication entre communautés alchimiques distinctes mais il permet par contre de garantir une certaine discrétion sur le contenu d'un traité alchimique, qui ne devient lisible que pour les membres initiés au code avec lequel il a été écrit.

3.1.2. Principes alchimiques dans la chimie moderne

Il est également possible de retrouver certains principes fondateurs de la chimie moderne dans l'écriture symbolique des alchimistes. Premièrement, ceux-ci font de la constance dans le changement la pierre angulaire de leur travail. La chimie d'aujourd'hui s'est construite sur cette ambivalence. En effet, la conservation de l'énergie et de la masse, conjuguée à la transformation des substances en d'autres substances, sont les concepts reliés aux deux facettes principales de la chimie moderne : décrire la structure de la matière et décoder la réactivité des substances.

Deuxièmement, la recherche systématique de symétries et d'antagonismes constitue un élément de structuration des démarches alchimiques. Tout est question d'équilibre, d'attraction et de répulsion, de chaud et de froid, de sec et d'humide, de féminin et de masculin. Ces antagonismes se retrouvent dans des catégories de la chimie moderne comme acide/base, oxydant/réducteur, électrophile/nucléophile, métaux/non-métaux, etc.

Troisièmement, les alchimistes ont une inclination pour la représentation en triangle (et les combinaisons de celui-ci). En effet, les symboles des quatre éléments⁶ sont constitués de triangles ou de leurs combinaisons (figure 6).

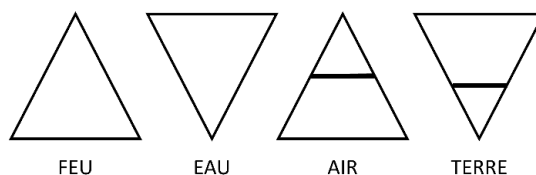


Figure 6. Représentations symboliques des quatre éléments.

⁶ Les quatre éléments sont liés aux états de la matière. Ainsi, la terre est associée à l'état solide, l'eau à l'état liquide et l'air à l'état gazeux. Le feu rend compte de la chaleur et de la lumière.

Le triangle est également utilisé pour représenter la triade des principes : mercure, soufre et sel⁷. Il traduit la présence d'un médiateur entre deux forces ou objets antagonistes : le sel est ainsi médiateur entre le soufre et le mercure. De la même manière, la chimie moderne tend à reproduire des triades présentant un médiateur (par exemple, le triangle du feu).

Quatrièmement, la réaction chimique entre deux substances ne peut être représentée valablement, chez les alchimistes, que par des figures permettant une inclusion, une superposition ou encore une liaison entre les deux symboles des substances de départ : il s'agit des premières représentations imagées des réactions chimiques (figure 7).

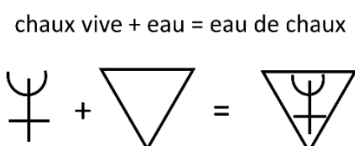


Figure 7. Représentation symbolique de la formation de l'eau de chaux avec les symboles alchimiques (d'après Edeline, 2009).

Ce symbole de l'eau de chaux véhicule à la fois l'idée de la conservation (des éléments) et celle de la transformation (des substances). Il n'a pas pour vocation d'expliquer le processus réactionnel ; il permet simplement de connaître les substances de départ nécessaires à l'obtention du produit.

Nous ne pouvons terminer ce panorama des apports de l'alchimie dans la symbolique chimique actuel sans citer Jean Béguin, considéré comme l'inventeur de la première « équation » chimique jamais écrite (figure 8).

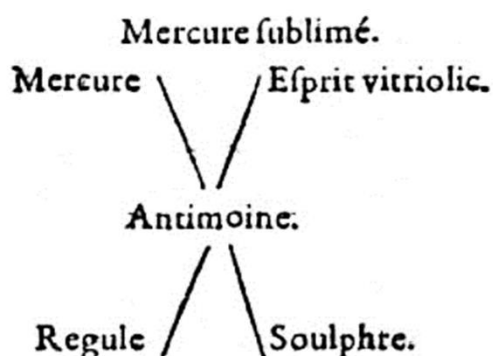


Figure 8. Diagramme de la réaction du sulfure d'antimoine avec le chlorure mercureux (Béguin, 1615, p. 245).

⁷ En alchimie, le mercure est un des vecteurs de la caractéristique métallique des corps, le soufre est à l'origine de l'inflammabilité des corps, alors que la présence de sel génère le caractère acide des substances.

Dans son *Tyrocinium Chymicum* paru en 1610 (édité en français en 1615 sous le titre de « *Les Elemens de chymie* »), Béguin relate le résultat de la calcination et de la distillation d'antimoine⁸ en présence de mercure sublimé⁹. Il écrit (Béguin, 1615, p. 167-168) :

C'est pourquoi retournant à mon propos, je dis que l'esprit vitriolique¹⁰ a une extrême sympathie avec les métaux, et d'autant plus ou moins avec les autres minéraux, qu'ils approchent ou qu'ils sont éloignés de la nature métallique. Et parce que le régule d'antimoine approche plus de la nature métallique que le mercure, voilà pourquoi distillant le mercure sublimé avec l'antimoine, l'esprit vitriolique du sublimé quitte le mercure et se joint et s'attache à l'antimoine. Et se faisant, pressé et chassé par la chaleur [...], l'esprit de vitriol se dissout dans l'eau et le régule tombe en poudre blanche au fond du récipient. [...] ne reste plus dans la cornue que le mercure du sublimé et le soufre de l'antimoine. [...] J'en conclus donc par ces expériences infaillibles que la poudre émétique n'est autre chose que le régule d'antimoine calciné, par l'esprit vitriolique qui est dans le sublimé.

Pourtant, le schéma de Béguin relève davantage d'un diagramme de réaction que d'une équation chimique, en ce qu'il ne rend pas compte de la conservation de la masse. Il s'agit plutôt d'un ingénieux prélude à l'équation chimique moderne, relevant notamment des « affinités » entre certaines substances (ici, entre l'esprit vitriolique et les métaux). Le schéma montre également la composition des réactifs de départ grâce aux produits d'arrivée : le mercure sublimé est composé de mercure et d'esprit vitriolique, alors que l'antimoine se constitue de régule d'antimoine et de soufre. Par ses apports oscillant entre une démarche scientifique méthodique et un vocabulaire alchimique parfois opaque, Béguin se situe au croisement entre l'alchimie et la chimie du XVIII^{ème} siècle.

Bref, l'héritage alchimique est lourd de significations et de symboles en tous genres, basés sur l'observation d'une part, et une libre interprétation d'autre part. La représentation des réactions chimiques (et donc des substances) va considérablement changer au début du XVIII^{ème} siècle avec l'apport de la théorisation de l'affinité chimique.

3.2. L'affinité chimique

Boerhaave a énoncé en 1733 le concept d'affinité comme « la force en vertu de laquelle les particules des corps se recherchent, s'unissent et se retiennent » (Brunold, 1930). En 1718 déjà, Geoffroy publia la *Table des différents rapports*, qui représente un ordre de réaction entre substances, sur base d'un rapport d'affinité (figure 9).

⁸ L'antimoine (ou antimoine crud) est l'appellation du sulfure d'antimoine Sb_2S_3 (ou stibnite). L'antimoine « métallique » est nommé « régule d'antimoine ».

⁹ Le mercure sublimé (ou mercure doux) est le chlorure mercurieux Hg_2Cl_2 (aussi appelé calomel). Le mercure sublimé corrosif est le chlorure de mercure (II), $HgCl_2$.

¹⁰ L'esprit vitriolique est probablement dans ce cas l'acide chlorhydrique, dissous dans l'eau.

↶	⊖	⊕	⊗	▽	⊖	⊕	SM	△	♀	♂	♀	♂	♂	♂	♂	♂
⊖	2	♂	△	⊖	⊕	⊗	⊖	⊖	⊖	♂	♂	♂	♂	♂	♂	♂
⊕	♂	♀	⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	♂	♂	♀	PC	♀	♂	♂	♂	♂
▽	♀	♂	⊕	⊖	⊖	⊖	⊖	♀	♂							
SM	♂	♀	▽		⊕		⊕	♂	♀							
	♀	♂	♂		△			♂	♂							
			♀					♂	♂							
			♂					♂	♂							
	⊖							♂								

↶ Esprits acides.	▽ Terre absorbante.	♂ Cuivre.	△ Soufre mineral. [Principe.
⊖ Acide du sel marin.	SM Substances metalliques.	♀ Fer.	♂ Principe huileux ou Soufre
⊕ Acide nitreux.	♂ Mercure.	♂ Plomb.	♂ Esprit de vinaigre.
⊗ Acide vitriolique.	⊖ Regule d'Antimoine.	2 Etain.	▽ Eau.
⊖ Sel alcali fixe.	♂ Or.	♂ Zinc.	♂ Sel.
♂ Sel alcali volatil.	♂ Argent.	♂ Pierre Calaminaire.	♂ Esprit de vin et Esprits ar

Figure 9. Table des différents rapports entre substances (Geoffroy, 1718).

En plus de son remarquable caractère synthétique, la *Table* de Geoffroy a été conçue dans le but de faciliter son interprétation. Prenons la première colonne qui indique les rapports d'affinité entre les « esprits acides » (en tête de colonne) et d'autres substances (reste de la colonne). On voit que le « sel alcali fixe » (par exemple, NaOH en chimie moderne) a plus d'affinité avec l'acide que le sel alcali volatil (par exemple, NH₃ en chimie moderne). En effet, si un sel alcali fixe est ajouté à un corps résultant de l'union d'un acide avec un sel alcali volatil, une réaction de déplacement se produit et aboutit à la reformation du sel alcali volatil de départ. La capacité d'une substance Z à « chasser » une substance Y d'un corps composé XY rend compte d'une affinité plus forte entre la substance Z et la substance X que celle qui existe entre la substance Y et la substance X. Cette idée a donné lieu à de nombreux développements au cours du XVIII^{ème} siècle, les chimistes essayant de construire des tables hiérarchisant les degrés d'affinité des substances¹¹.

En 1756, William Cullen utilise des accolades et introduit une première flèche de réaction dans un schéma rendant compte d'une réaction de déplacement (figure 10). Il faut comprendre par cette figure que la substance B, initialement liée à A (par l'accolade, qui serait une des premières représentations d'une liaison chimique), se voit déplacée vers C, de par un rapport d'affinité plus important pour la substance C que pour la substance A (Crosland, 1959).

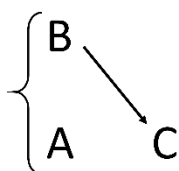


Figure 10. Représentation générale d'une réaction de déplacement selon Cullen.

¹¹ D'où le nom péjoratif de « fabricants de tables » donné aux chimistes travaillant sur l'affinité chimique (Brunold, 1930).

La figure 11 présente trois exemples d'écriture de Cullen avec les équations de réaction modernes placées en regard. L'ordre d'affinité avec le nitrate apparaît clairement : le zinc déplace le fer, le fer déplace le cuivre, le cuivre déplace l'argent.

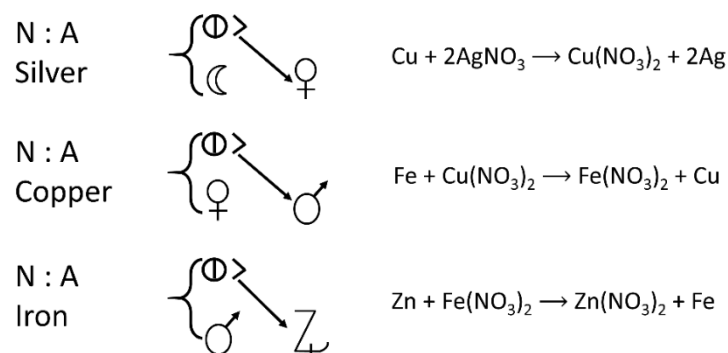


Figure 11. Schémas réactionnels de Cullen et équations chimiques modernes associées (Thims, 2007). Le symbole « N : A » rend compte de l'acide nitrique (et donc, de nos jours, du groupement « nitrate »).

Entre 1775 et 1785, Bergman publia ses célèbres tables d'attractions électives, en ordonnant plusieurs milliers de réactions chimiques et en utilisant les symboles alchimiques. L'affinité entre substances est alors considérée comme constante, même si de nombreuses anomalies viennent infirmer le classement idéal de Bergman (Bensaude-Vincent et Stengers, 1995). Ainsi, celui-ci constate que certaines réactions vont parfois dans un sens, parfois dans l'autre, en fonction de la quantité de réactifs de départ. Ce constat jette une ombre sur sa tentative de mise en ordre des réactions chimiques. Pour symboliser celles-ci, Bergman reprend des symboles inspirés de l'alchimie, et empruntés avant lui par Geoffroy. L'utilisation d'accolades multiples, semblables à celles de Cullen, permet une représentation de la réaction chimique sous la forme d'un plan (figure 12).

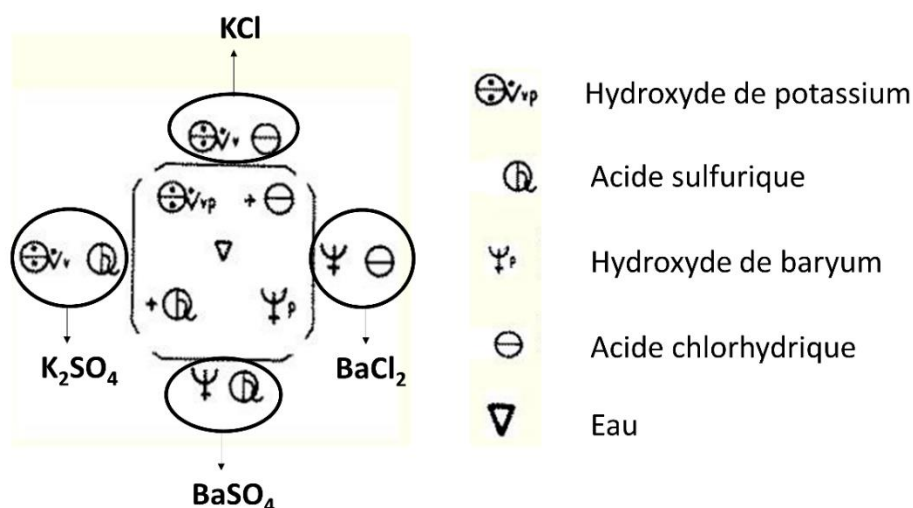


Figure 12. Exemple de schéma réactionnel de Bergman (1785). Nous avons ajouté la légende jouxtant le schéma et les formules moléculaires pour une meilleure compréhension de la figure.

Cette figure représente la réaction entre le sulfate de potassium (indiqué par les symboles jouxtant l'accolade de gauche) et le chlorure de baryum (indiqué le long de l'accolade de

droite). Les produits de réaction sont le sulfate de baryum (indiqué le long de l'accolade du bas) et le chlorure de potassium (indiqué le long de l'accolade du haut). Les signes « + » au centre du schéma réactionnel soulignent l'affinité supérieure d'une substance pour une autre (par exemple, l'acide sulfurique pour le baryum). L'eau, symbolisée par un triangle, constitue le milieu de réaction. La symbolique de Bergman a ceci de particulier qu'elle se base sur la représentation d'un composé via deux réactifs qui permettent sa formation. Ainsi, le sulfate de potassium est représenté par la juxtaposition des symboles de l'hydroxyde de potassium et ceux de l'acide sulfurique. Ce type de schéma réactionnel a rencontré un grand succès, puisque l'on en trouve des exemples dans des articles scientifiques jusqu'avant 1900.

La fin du XVIII^{ème} siècle voit la remise en question de la théorie de l'affinité chimique, ainsi que la naissance des premiers systèmes symboliques ordonnés. Cependant, on trouve encore des diagrammes représentant des réactions chimiques jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, avec le remplacement graduel des symboles alchimiques par des noms (figure 13), et enfin le remplacement des noms par les symboles chimiques modernes (Jensen, 2005).

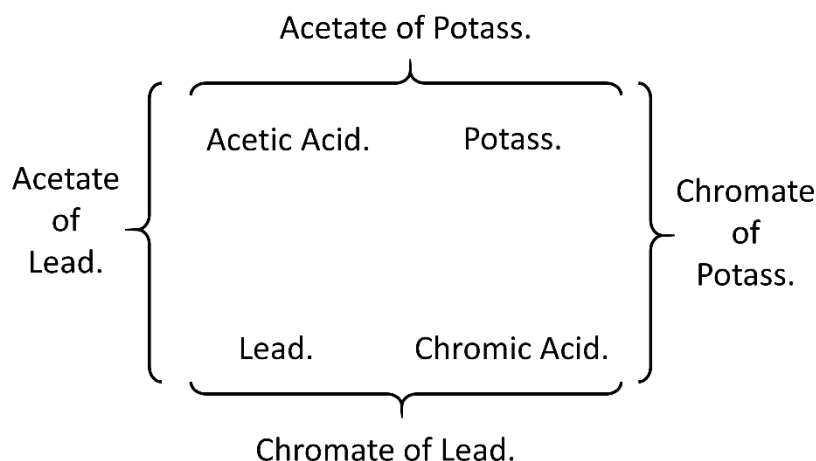


Figure 13. Diagramme représentant la réaction chimique entre l'acétate de plomb et le chromate de potassium (d'après Bidlake, 1858). Les symboles alchimiques sont ici remplacés par des noms issus de la nouvelle nomenclature de Lavoisier.

3.3. Lavoisier et la révolution langagière

3.3.1. Nécessité et limites de la nouvelle nomenclature

Le langage alchimique ne permet pas une communication efficace entre savants. Selon Liu et Taber (2016), le manque de nomenclature rationnelle constitue, au XVIII^{ème} siècle, un frein dans l'avancement de la chimie naissante. Les noms des substances sont peu informatifs, s'inspirant d'un lieu (« spanish green » pour l'acétate de cuivre), du processus d'obtention (« esprit de sel » pour l'acide chlorhydrique) ou encore de l'une ou l'autre propriété caractéristique (« aqua fortis » pour l'acide nitrique concentré) (Fabbrizzi, 2008). En France, Lavoisier voit dans ce langage opaque un obstacle majeur à l'enseignement raisonné des sciences, nécessaire pour résorber le retard industriel français au crépuscule du XVIII^{ème} siècle. Il faut donc rompre avec les pratiques du passé, tout en fédérant un maximum de scientifiques

autour du projet¹². L'explosion du nombre de substances isolées et des méthodes d'analyse allait fournir la clé d'une refondation de la langue des chimistes : la matière semble être constituée de combinaisons d'unités simples formant des parties plus complexes. L'existence de ces « éléments » ou « principes » indécomposables fonde la nouvelle nomenclature de Lavoisier, basée sur le parallélisme physico-grammatical : les préfixes, radicaux et désinences rendent compte de la composition élémentaire des substances. Pour construire ce code original, Lavoisier va emprunter aux racines grecques¹³ afin d'éviter toute confusion avec la langue ordinaire, tout en conservant une consonance française.

Cependant, le nouveau langage se verra très vite dépassé par la nécessité d'une écriture symbolique. En effet, la langue ordinaire modifiée forgée par Lavoisier rencontre trois problèmes majeurs (Dagognet, 1969 ; Liu et Taber, 2016).

- Les nouveaux noms n'ont pas entièrement balayé les anciens noms, qui subsistent dans le langage courant des chimistes du XVIII^{ème} siècle, entraînant multidésignations et confusions telles qu'en connaissaient les alchimistes avant Lavoisier. La révolution langagière de Lavoisier n'a donc pas éradiqué les obstacles de communication hérités des alchimistes. Une notation réellement universelle doit alors s'imposer pour clarifier la communication.
- Corollaire du problème précédent, certains termes continuent de véhiculer des significations parasites dans la vie courante, comme par exemple les termes qui n'ont pas été adaptés par Lavoisier (« fer », « or », « mercure », etc.). Par ailleurs, certains termes de l'ancienne et de la nouvelle nomenclature ne fournissent pas les informations de composition souhaitées par Lavoisier (« eau », « ammoniac », « acide muriatique », « acide oxalique », etc.).
- Enfin, la langue ordinaire modifiée de Lavoisier est incapable de rendre des informations quantitatives complexes, comme un rapport volumique des substances formant un corps composé. En effet, le terme « acide sulfurique » n'intègre pas le ratio entre volumes de soufre, d'hydrogène et d'oxygène dans la substance « acide sulfurique ». La découverte de la stœchiométrie par Richter en 1792, et donc de rapports constants entre substances entrant en réaction, offrira une nouvelle opportunité d'identifier les substances non pas par le nom des éléments qui la composent, mais bien par le ratio de ces éléments dans la particule élémentaire.

¹² Lavoisier précise à la fin de la préface de la *Méthode de nomenclature chimique* (1787) que ce travail de refondation doit être considéré comme la mise en œuvre d'un souhait des anciens chimistes illustres, et non comme une remise en question brutale des pratiques de ses prédécesseurs : « Nous pardonnera-t-on d'avoir changé la langue que nos maîtres ont parlée, qu'ils ont illustrée, et qu'ils nous ont transmise ? Nous l'espérons d'autant plus que c'est Bergman et Macquer qui ont sollicité cette réforme. Le savant professeur d'Upsal, M. Bergman, écrivait à M. de Morveau, dans les derniers temps de sa vie : *Ne faites grâce à aucune dénomination impropre. Ceux qui savent déjà entendront toujours, ceux qui ne savent encore pas entendront plus tôt.* Appelés à cultiver le champ qui a produit pour ces chimistes de si abondantes récoltes, nous avons regardé comme un devoir de remplir le dernier vœu qu'ils ont formé » (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 16).

¹³ Qui donneront par exemple « oxygène », « azote », « hydrogène ».

3.3.2. Premier système symbolique, première équation chimique

La première contribution à une écriture symbolique chimique est d'ailleurs associée à la fameuse *Méthode de nomenclature chimique* de Guyton de Morveau, Lavoisier, Berthollet et de Fourcroy (1787). Hassenfratz et Adet y proposent un « nouveau système de caractères chimiques » joint à la fin de la *Méthode*. Ce système est dépeint comme « des nouveaux signes adaptés à la nouvelle nomenclature [...], de beaucoup préférables aux anciens, et qui ont le grand mérite de peindre aux yeux, non des mots, mais des faits. » (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 311-312). Pourtant, le système de Hassenfratz et Adet emprunte abondamment au symbolisme alchimique, en présentant un grand nombre de figures géométriques classiques (triangles, cercles, droites)¹⁴. L'apport principal réside dans l'ajout de lettres inscrites dans les figures et permettant d'associer le symbole au nom de la nouvelle nomenclature (figure 14).

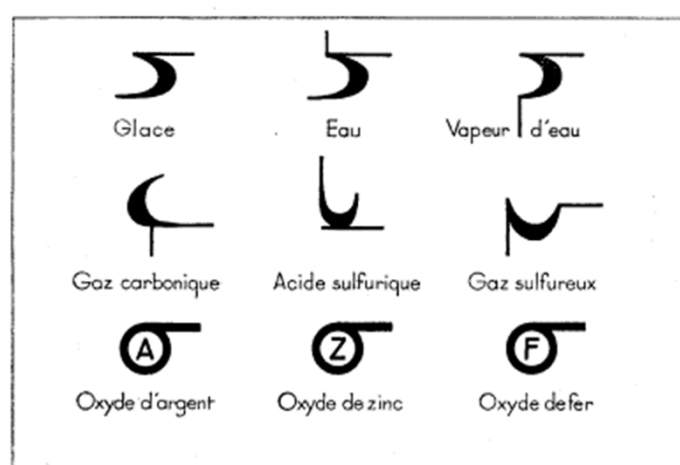


Figure 14. Exemples de symboles du système de Hassenfratz et Adet (Guyton de Morveau *et al.*, 1787).

Cette tentative de formulation ne rencontrera pas le succès escompté, et ne sera d'ailleurs que très peu utilisée par les auteurs de la *Méthode* eux-mêmes. Cet échec s'explique par l'incapacité de ce système à rendre aisément les rapports quantitatifs de combinaison entre éléments, et par l'aversion de Lavoisier pour les systèmes symboliques : c'est bien par le langage oral que celui-ci mène sa révolution, et non par l'usage de caractères hiéroglyphiques pour initiés (Dagognet, 1969). Lavoisier n'utilisera en tout et pour tout qu'une seule fois cette « notation cabalistique » dans son œuvre (Lavoisier, 1782). Cette critique de l'écriture symbolique est pourtant paradoxale au vu de sa volonté de ramener la chimie à une algèbre dans son *Traité Élémentaire de chimie* (1789). Il y écrit en effet la première équation chimique nominative, rendant compte de la conservation de la masse au cours d'une réaction chimique :

« moût de raisin = acide carbonique + alkool »

¹⁴ Il est à noter que le système de Hassenfratz et Adet implique le recours à des symboles graphiques spécifiques pour des éléments fréquents ou des familles : un trait horizontal pour l'oxygène, un cercle pour un métal, etc. La longueur de la barre verticale indiquait la quantité de calorique contenu dans la substance, ce qui explique les symboles respectifs de la glace, de l'eau et de la vapeur d'eau (figure 14). Les états de la matière étaient donc en partie représentés dans ce système.

Cette équation est précédée du très célèbre texte exposant la loi de la conservation de la matière (Lavoisier, 1789, p. 141) :

Rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que dans toute opération, il y a une égale quantité de matière avant et après l'opération, que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications. C'est sur ce principe qu'est fondé tout l'art de faire des expériences en chimie. On est obligé de supposer dans toutes une véritable égalité ou équation entre les principes du corps qu'on examine et ceux qu'on en retire par l'analyse.

L'utilisation conjointe du signe « + », du signe « = » et la linéarisation de l'énoncé constituent une première, et installent une relation nouvelle entre mathématiques et chimie, qui sera promise à un grand avenir¹⁵. On retiendra malgré tout que Lavoisier nuance cet usage des mathématiques en chimie en déclarant que « nous sommes encore bien loin de pouvoir porter dans la chimie la précision mathématique » (Lavoisier, 1782, p. 515) et, par conséquent, le lecteur doit considérer les propositions de Lavoisier « comme de simples annotations, dont l'objet est de soulager les opérations de l'esprit » (Lavoisier, 1782, p. 515). Le recours au symbolique, pour Lavoisier, est donc avant tout un outil pratique, mais en aucun cas une alternative à la nomenclature nouvelle.

3.4. De Dalton à Berzelius

3.4.1. Système symbolique de Dalton

Dalton propose son propre système de notation symbolique dans son *New System of Chemical Philosophy* (1808). Les atomes y sont identifiés par des cercles dans lesquels sont incrustées des formes diverses (barres, étoiles, croix) et des lettres représentant l'initiale du terme associé à la substance en langue anglaise. Par exemple, l'atome de carbone est représenté par la lettre « C » à l'intérieur d'un cercle (figure 15).

Ce système ingénieux ne fut pourtant pas popularisé. En effet, les présupposés théoriques à la base des représentations de Dalton (en particulier l'hypothèse atomiste) n'étaient pas partagés par l'ensemble de la communauté scientifique de l'époque. De plus, les règles d'affinité chimique, qui stipulent que deux particules identiques doivent se repousser, rendaient complexes, voire impossibles, certaines représentations de substances telles que proposées par Dalton (Klein, 2001). Par exemple, deux atomes ne peuvent être liés directement l'un à l'autre pour des raisons d'affinité chimique de même signe. Enfin, le système engendrait des problèmes de communication dus à l'usage d'initiales de termes en anglais, susceptibles de jeter une certaine confusion sur la substance considérée pour les locuteurs non-anglophones. Ainsi, le symbole de Dalton pour l'argent est un « S » (pour « silver ») incrusté dans un cercle,

¹⁵ Cette intention est précisée dans la *Méthode* (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 6) : « Les langues n'ont pas seulement pour objet, comme on le croit communément, d'exprimer par des signes des idées et des images, ce sont, de plus, de véritables méthodes analytiques, à l'aide desquelles nous procédons du connu à l'inconnu, et jusqu'à un certain point à la manière des mathématiciens : essayons de développer cette idée. »

ce qui pouvait être interprété comme un symbole du soufre pour un chimiste de langue française.

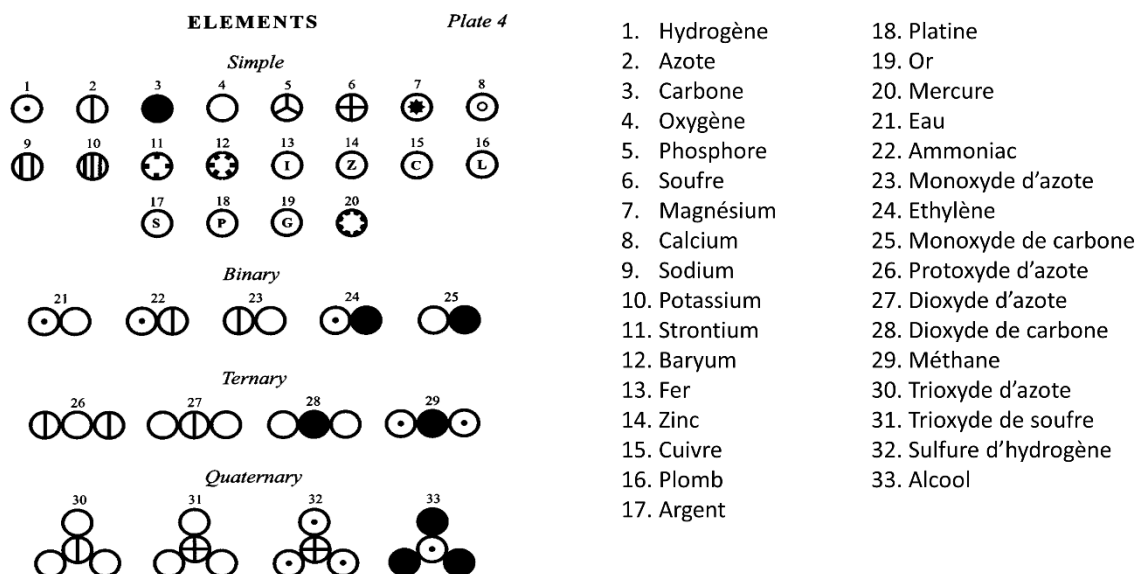


Figure 15. Exemples de représentations symboliques de Dalton (1808-1827). Nous avons ajouté la légende jouxtant les symboles de Dalton.

3.4.2. Système symbolique de Berzelius

La plupart des symboles chimiques actuels sont introduits en 1813 par Berzelius. Le système rencontre un succès quasi immédiat pour diverses raisons que nous allons développer. Ces raisons sont directement liées aux grandes caractéristiques de la notation symbolique de Berzelius.

1) Une restriction importante dans le choix des symboles

Berzelius choisit non seulement d'utiliser des lettres de l'alphabet latin, mais également d'abandonner toutes formes géométriques, pourtant omniprésentes dans les précédentes contributions. Il justifie ce choix en écrivant (Berzelius, 1813-1814) :

The chemical signs¹⁶ ought to be letters, for the greater facility of writing, and not to disfigure a printed book. Though this last circumstance may not appear of any great importance, it ought to be avoided whenever it can be done¹⁷.

La raison qu'invoque Berzelius peut paraître prosaïque, mais elle s'inscrit dans les enjeux importants de son siècle : il s'agit de permettre une diffusion facilitée des œuvres scientifiques par impression massive des ouvrages ; les caractères empruntés à l'alphabet latin intégreront plus aisément un texte en langue ordinaire. Par la suite, Berzelius ajoute à son système des

¹⁶ Notons que Berzelius parle de « signes chimiques » et non de « symboles chimiques ». Le terme « symbole chimique » sera progressivement introduit dans les années 1830 (de Menten, 2013).

¹⁷ « Les symboles chimiques doivent être des lettres pour une plus grande facilité d'écriture et pour ne pas défigurer un livre imprimé. Bien que cette circonstance puisse apparaître peu importante, il est préférable qu'elle soit évitée autant de fois qu'on le peut » (traduction libre).

notations qui s'éloignent de la langue ordinaire, mais qui permettent de gagner de la place : le point placé au-dessus du symbole chimique désigne l'atome d'oxygène ; un trait barrant la lettre signifie un doublement de la particule (figure 16).

Noms des substances	Formules	« Poids de l'atome » (23)	
		O = 100	H = 1
Hydrogène	H	6,2398	0,50
	H	12,4796	1,00
Carbone	C	76,44	6,13
Eau	H [.]	112,48	9,01
Ac. sulfurique (24).	S [.]	301,16	40,16
Soude (25)	Na	390,90	31,32
Chlor. sodique (26).	Na Cl	733,55	58,78
Alcool	CH ² O	290,31	23,26

Figure 16. Exemples de représentations symboliques de Berzelius (1828).¹⁸

Ces notations particulières, abandonnées par Berzelius lui-même pour des substances plus complexes, ne seront pas non plus conservées par la postérité, en vertu sans doute de l'argument de leur auteur : tout symbole étranger aux signes de la langue ordinaire rend plus complexe la diffusion des connaissances exprimées dans cette langue. D'ailleurs, pour réaliser son système, Berzelius n'invente stricto sensu aucun symbole (contrairement à ses prédécesseurs) : il emprunte uniquement des symboles existant dans d'autres systèmes sémiotiques.

2) Une référence systématique au nom latin

Berzelius construit ses symboles selon des règles simples basées sur deux grands principes : la primauté du terme latin et la distinction entre métaux et métalloïdes. Il note (Berzelius, 1813-1814) :

I shall take, therefore, for the chemical sign, the initial letter of the Latin name of each elementary substance: but as several have the same initial letter, I shall distinguish them in the following manner: 1. In the class which I call metalloids, I shall employ the initial letter only, even when this letter is common to the metalloid and to some metal. 2. In the class of metals, I shall distinguish those that have the same initials with another metal, or a metalloid, by writing the first two letters of the word. 3. If the first two letters be common to two metals, I shall, in that case, add to the initial letter the first consonant which they have not in common: for example, S = sulphur, Si =

¹⁸ Il est à noter que la référence pour le poids de l'atome est bien la substance « hydrogène » symbolisée par H (en tête de la quatrième colonne), mais dont la formule est ~~H~~. Il y a donc confusion entre l'atome d'hydrogène « H » et l'élément hydrogène « H », dont la forme la plus stable dans les conditions standard est le dihydrogène « H₂ » ou « ~~H~~ » ici.

silicium, St = stibium (antimony), Sn = stannum (tin), O = oxygen, Os = osmium, &c.¹⁹.

La nomenclature latine est retenue car elle est « commune aux naturalistes de tous les pays, et peut servir à tous, sans qu'il soit nécessaire de la changer suivant la langue » (Berzelius, 1838, p. 266). Le choix du nom latin ne rencontre cependant pas un accord unanime, ce qui engendre de multiples modifications par rapport à la première version de Berzelius. Des symboles associés à des noms latinisés à consonances germaniques ou anglaises²⁰ sont ajoutés pour équilibrer quelque peu le système. Cependant, la majeure partie des symboles chimiques reste issue de l'abréviation de termes en langue latine²¹. La distinction entre métaux et métalloïdes est liée à la théorie dualistique de Berzelius abordée ci-après.

3) Une mathématisation accrue de la symbolique chimique

Berzelius a l'originalité de développer la notation mathématique déjà embryonnaire chez Lavoisier. Il ajoute des chiffres aux signes « + » et « = », introduits par ce dernier, en leur donnant un sens chimique. On peut lire (Berzelius, 1813-1814) :

The chemical sign expresses always one volume of the substance. When it is necessary to indicate several volumes, it is done by adding the number of volumes : for example, the oxidum cuprosum (protoxide of copper) is composed of a volume of oxygen and a volume of metal ; therefore its sign is Cu + O. The oxidum cupricum (peroxide of copper) is composed of 1 volume of metal and 2 volumes of oxygen ; therefore its sign is Cu + 2O. In like manner, the sign for sulphuric acid is S + 3O ; for carbonic acid, C + 2O ; for water, 2H + O, &c²².

Le système de Berzelius répond à la demande pressante de pouvoir représenter les rapports quantitatifs entre éléments formant un corps composé. Le symbole chimique est avant tout la représentation d'un volume de la substance. Il n'est donc absolument pas question, dans cette première version, de représenter la substance d'un point de vue microscopique (atomes,

¹⁹ « Je prendrai donc, pour le symbole chimique, la lettre initiale du nom latin de chaque substance élémentaire. Mais comme quelques symboles présentent la même lettre initiale, je les distinguerai de la façon suivante : 1. Dans la classe que j'appelle métalloïdes, j'emploierai uniquement la lettre initiale, même si cette lettre est commune à d'autres métaux ou métalloïdes. 2. Dans la classe des métaux, je distinguerai ceux qui ont les mêmes lettres initiales en écrivant les deux premières lettres du mot. 3. Si les deux premières lettres sont communes à deux métaux, j'ajouterai à la lettre initiale la première consonne qu'ils n'ont pas en commun. Par exemple, S pour sulphur, Si pour silicium, St pour stibium, Sn pour stannum, C pour carbonicum, Cu pour cuprum, Co pour cobaltum, O pour oxygen, Os pour osmium » (traduction libre).

²⁰ Par exemple, citons « Na » pour le sodium, en référence au terme germanique latinisé « natrium ». La première version de Berzelius indiquait le symbole « So » pour le sodium.

²¹ Notons que Berzelius fait évoluer les règles d'écriture dans son *Traité de chimie* (1838). D'une part, la lettre minuscule ajoutée aux symboles chimiques des métaux n'est plus la première consonne qui n'est pas non-commune, mais bien la première lettre non-commune. D'autre part, il admet quelques exceptions pour les métalloïdes : le chlore, le silicium et le brome présentent des symboles chimiques à deux lettres (Cl, Si, Br) afin de ne pas concurrencer les symboles chimiques du carbone, du soufre et du bore (C, S, B).

²² « Le symbole chimique exprime toujours un volume de substance. Quand il est nécessaire d'indiquer plusieurs volumes, on le fait en ajoutant le nombre de volumes : par exemple, l'"oxidum coprosum" (protoxyde de cuivre) est composé d'un volume d'oxygène et d'un volume de métal ; donc, son signe est Cu + O. L'"oxidum cupricum" (peroxyde de cuivre) est composé d'un volume de métal et de deux volumes d'oxygène ; donc, son signe est Cu + 2O. De la même manière, le signe pour l'acide sulfurique est S + 3O ; pour l'acide carbonique, C + 2O ; pour l'eau, 2H + O, etc. » (traduction libre).

molécules) mais de fournir un symbole pratique rendant compte d'une propriété macroscopique : ici, le nombre de volumes d'une substance entrant en jeu dans la formation d'un composé. L'extension du coefficient stœchiométrique à un nombre d'atomes d'un certain type dans un composé apparaîtra dans les articles ultérieurs de Berzelius, à partir de la fin des années 1820²³. Il est à noter que le chiffre « 1 » n'est jamais indiqué, à la fois pour simplifier l'écriture et parce qu'il est tacitement véhiculé par le symbole chimique lui-même. Le chiffre « 2 » présent dans l'expression « C + 2O » peut surprendre les chimistes d'aujourd'hui. En effet, il semble relever à la fois de l'indice (car il indique un ratio à l'intérieur d'un composé) et du coefficient (car le chiffre est placé devant le symbole chimique). La confusion a d'ailleurs subsisté jusqu'à la moitié du XIX^{ème} siècle.

Le signe « + », en outre, prend une signification spéciale dans l'écriture symbolique de Berzelius. Il sépare les éléments formant le corps composé, tout en soulignant que ces éléments s'« additionnent » pour former la substance. Dans ce système, le signe « + » est également un produit de la théorie qui sous-tend le travail de Berzelius.

4) La conception dualistique de la matière

Dans sa théorie, Berzelius distingue les électropositifs (métaux) et les électronégatifs (métalloïdes), qui s'agglomèrent selon des règles d'« électroaffinité ». Dans l'exemple cité plus haut, le cuivre (électropositif) est attiré par l'oxygène (électronégatif), formant ainsi l'oxyde de cuivre (I ou II). Berzelius reconnaît d'ailleurs une négativité absolue à l'oxygène, « comme il n'est jamais positif relativement à aucun autre » (Berzelius, 1818-1819). Berzelius va plus loin en affirmant que tout corps composé est lui-même issu de l'association de deux constituants, l'un électropositif et l'autre électronégatif. C'est la conception dualistique binaire de la matière (Dagognet, 1969). À ce sujet, Berzelius écrit (Berzelius, 1813-1814) :

When we express a compound volume of the first order, we throw away the « + », and place the number of volumes above the letter : for example, $\text{CuO} + \text{SO}^3 =$ sulphate of copper, $\text{CuO}^2 + 2\text{SO}^3 =$ persulphate of copper²⁴.

Par cet exemple, Berzelius applique sa théorie dualistique : l'oxyde basique (composé d'un métal et d'oxygène) est électropositif, tandis que l'oxyde acide (formé d'un métalloïde et d'oxygène) est électronégatif. L'abandon du signe « + » initial entre les symboles Cu et O sera très vite généralisé dans le courant des années 1820, mais la présence du signe « + » dans les composés plus complexes perdurera jusqu'au début du XX^{ème} siècle. Il est intéressant de noter, dans la version compactée de la formule chimique, le déplacement du chiffre indiquant le nombre de volumes de substance en exposant du symbole chimique : l'oxyde acide « S + 3O » devient « SO^3 ». De nouveau, le chimiste d'aujourd'hui s'étonnera que notre indice actuel soit placé en exposant du symbole chimique, après avoir été placé devant ce même symbole dans

²³ Par exemple, dans son *Traité de chimie* (1838), Berzelius écrit : « Le nombre des atomes est désigné par des chiffres. Un chiffre à gauche multiplie tous les atomes placés à sa droite, jusqu'au premier « + » ou jusqu'à la fin de la formule » (Berzelius, 1838, p. 265).

²⁴ « Quand nous exprimons le volume d'un composé de premier ordre, on enlève le "+", et on place le nombre de volumes au-dessus de la lettre : par exemple, $\text{CuO} + \text{SO}^3 =$ sulfate de cuivre, $\text{CuO}^2 + 2\text{SO}^3 =$ persulfate de cuivre » (traduction libre).

les premières propositions de Berzelius. Notons enfin que la théorie de l'électroaffinité impose également une règle de conversion de la formule chimique dans la langue ordinaire modifiée : on commence par citer la partie électronégative pour terminer par la partie électropositive. On dira donc « sulfure de carbone » et non « carbure de soufre », alors que l'on écrira « CS₂ » et non « S₂C ».

5) Des parenthèses qui facilitent l'interprétation

Berzelius inaugure aussi l'usage systématique de parenthèses pour séparer ce qu'il appelle « des volumes de deuxième ordre » : « for example, alum is composed of 3 volumes of sulphate of alumina and 1 volume of sulphate of potash. Its symbol is 3(AlO² + 2SO³) + (Po² + 2SO³)^{25,26} » (Berzelius, 1813-1814).

Ces parenthèses sont un emprunt de plus au système symbolique mathématique, renforçant ainsi l'aspect algébrique de la formule chimique.

6) Réception et limites

Bien que populaires et rapidement utilisés dans la communauté scientifique, les symboles de Berzelius furent sévèrement critiqués par certains de ses pairs. Langage construit pour être univoque, sans redondance, la symbolique de Berzelius fut jugée plus proche d'un code, d'une sténographie qui a certes « exalté la compréhension » mais aussi « déprim[é] l'imagination » (Knight, 2003). Ce côté clinique du système, sans doute dû aux nombreux emprunts à la symbolique mathématique, ne suggère en effet aucune hypothèse sur la nature même de la matière. L'autre critique majeure concerne les processus en jeu : en plus de ne pas décrire l'intimité de la matière, le système de Berzelius ne tente même pas de décrire les mécanismes de transformation de celle-ci. Bref, pour une partie non négligeable des chimistes de l'époque, la symbolique de Berzelius n'apporte rien de neuf à la discipline, tout au plus des abréviations d'un langage déjà suffisamment performant (Klein, 2002).

Dans une publication célèbre, Ursula Klein (2002) rejoue le procès virtuel de Berzelius en prenant fait et cause pour le chimiste suédois. Par un habile changement de perspective, elle retourne les critiques énoncées ci-dessus en faveur de la symbolique de Berzelius. Klein relève que ce serait précisément l'absence de redondances qui garantit l'univocité : chaque formule chimique est censée représenter une seule et unique substance. Ce serait justement l'absence de référence déclarée à la composition intime de la matière qui permet au système d'être performant (voire performatif) : isolé de toute théorie discutable, il peut servir d'outil à tous les chimistes. Ce serait encore le recours aux signes mathématiques qui fait de la symbolique de Berzelius un outil efficace pour expliquer et prévoir des quantités de produits formés. Enfin, au contraire de la « déprimer », le système de Berzelius exalterait plutôt l'imagination des

²⁵ « Par exemple, l'alun est composé de trois volumes de sulfate d'aluminium et d'un volume de sulfate de potassium. Son symbole est 3(AlO² + 2SO³) + (Po² + 2SO³) » (traduction libre).

²⁶ Le symbole « Po », présent dans la formule chimique donnée par Berzelius, est le symbole précurseur du potassium. Le symbole du potassium devient « K » dans les articles ultérieurs de Berzelius. La formule chimique moderne de l'alun est KAl(SO₄)₂.12 H₂O.

chimistes, jusqu'à permettre l'élaboration de nouvelles théories, dont le concept de substitution proposé par Dumas en 1827 (Dumas et Boullay, 1827).

3.5. De 1814 à nos jours

L'importante proposition de Berzelius a connu, jusqu'à aujourd'hui, différentes modifications dues aux progrès continus enregistrés par la chimie moderne.

3.5.1. Formules empiriques, rationnelles et générales

Berzelius distingue, en 1833, les formules empiriques²⁷ et les formules rationnelles. Les premières sont invariables, en tant qu'elles sont le reflet direct des résultats expérimentaux. Les secondes peuvent varier en fonction de l'intention de l'auteur, tant qu'elles rendent compte de l'attraction entre deux parties d'électroaffinité opposée. La formule rationnelle a pour vocation d'exprimer l'idée de la « combinaison intime » (Berzelius, 1833). Par exemple, la formule empirique de l'alcool est « C^2H^6O » ; par contre, les formules rationnelles de l'alcool peuvent prendre différentes formes (« $C^2H^4O + H$ » ; « $CH^3 + O$ » ; etc.) selon les parties considérées. Cette liberté de combinaison est essentielle pour comprendre les avantages de la notation de Berzelius. De fait, selon Klein, la théorie des radicaux en chimie organique sera bâtie en déplaçant « un peu plus à gauche, un peu plus à droite » (Klein, 2001, p. 28) les symboles de Berzelius dans les formules rationnelles. Ce fait historique confirme l'utilisation de la symbolique chimique comme « outil de papier » dans le cadre de l'établissement de formules rationnelles, guidées par la formule empirique déterminée par l'expérience. Les formules générales sont apparues plus tardivement, et leurs symboles furent introduits progressivement : « X » (pour « non-métal ») en 1838, « MO » (pour l'oxyde métallique) en 1844 (de Menten, 2013). Enfin, les formules synoptiques²⁸ de Laurent (1848) et les formules de Gerhardt (1853), issues de sa théorie des types²⁹, annoncent les formules de structure et les représentations iconiques.

3.5.2. De l'exposant à l'indice

En 1834, Liebig commence à écrire en indice (plutôt qu'en exposant) les chiffres donnant le nombre de volumes de substance (puis d'atomes) dans un corps composé. Berzelius désapprouve ce changement brutal, bien qu'il propose lui-même d'utiliser l'indice pour représenter un « double atome ». Par exemple, dans le sulfate ferrique, Berzelius pense que le fer existe sous la forme d'un double atome de fer, qu'il écrit « Fe_2 ». Le sulfate ferrique peut s'écrire « $Fe_2O^3 + 3SO^3$ » (Berzelius, 1838). Les indices et exposants coexistent ainsi dans une

²⁷ Les « formules empiriques » sont plus souvent appelées « formules brutes » de nos jours. Cette expression est déjà présente chez Dumas en 1834.

²⁸ Laurent définit les formules synoptiques comme des « formules dont la disposition soulage la mémoire, et qui supposent des arrangements analogues, dans les corps analogues ». Par exemple, « $CH^2 + O^2$ » est la formule synoptique de l'acide formique, et « $C^2H^4 + O^2$ » est la formule synoptique de l'acide acétique.

²⁹ La théorie des types postule que « dans l'état de la science, les composés organiques peuvent être ramenés à trois ou quatre types [...]. Ces types sont l'eau, l'hydrogène, l'acide chlorhydrique et l'ammoniaque. En échangeant leur hydrogène contre certains groupes, ces types donnent naissance aux acides, aux alcools, aux éthers, aux hydrures, aux radicaux, aux chlorures organiques, aux acétones, aux alcali » (Gerhardt, 1853, p. 337). Gerhardt emprunte les accolades de Bergman pour construire les formules rationnelles.

même notation symbolique. Ce débat entre Berzelius et Liebig aura pour conséquence directe que seuls les chimistes allemands emboîteront le pas à Liebig, au cours du XIX^{ème} siècle, les autres restant fidèles aux préceptes de Berzelius. Il faut attendre le début du XX^{ème} siècle pour que se généralisent les indices dans les ouvrages en langue française (de Menten, 2013).

3.5.3. Linéarisation de l'équation chimique et usage de la virgule

Entre 1820 et 1850, les équations chimiques symboliques linéarisées commencent à apparaître en étant combinées aux diagrammes d'affinité (Jensen, 2005). On trouve un exemple d'équation chimique linéaire chez Thénard en 1827 (figure 17), ou encore chez Fownes en 1847. On note la présence de chiffres en exposant dans les formules chimiques (selon les règles d'écriture de Berzelius), ainsi que la présence du signe « = » entre les deux termes de l'équation.

Formule atomique.

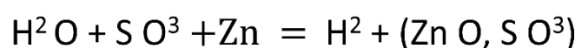


Figure 17. Équation de réaction de l'acide sulfurique avec le zinc d'après Thénard (1827).

Thénard ajoute une virgule entre les composants du sulfate de zinc (« ZnO, SO³ »), alors que Berzelius préconise l'usage du signe « + » (« ZnO + SO³ »). Les deux pratiques coexisteront, essentiellement pour la notation symbolique des sels, jusqu'à la disparition progressive de l'écriture symbolique basée sur la théorie dualistique. Pour l'anecdote, Berzelius (1838) propose d'utiliser la virgule pour indiquer le nombre d'atomes de soufre dans le composé, à la manière des points symbolisant l'oxygène, ce qui donne des écritures parfois complexes. La figure 18 montre, avec le « sulfomolybdate potassique », un exemple de cette pratique. Berzelius étend même ce choix graphique en symbolisant le sélénium par un signe « - » et le tellure par un signe « + », placés au-dessus du symbole chimique de l'atome auquel le sélénium (ou le tellure) est lié.

$\overset{\cdot}{\text{K}} \overset{\cdot\cdot}{\text{Mo}}$	Oximolybdate potassique.
$\overset{\cdot}{\text{K}} \overset{\cdot\cdot\cdot}{\text{Mo}}$	Sulfomolybdate potassique.
$\bar{\text{K}} \bar{\text{Mo}}$	Sélénimolybdate potassique.
$\overset{+}{\text{K}} \overset{+++}{\text{Mo}}$	Tellurimolybdate potassique.

Figure 18. Exemple de notations symboliques avec points (symbole de l'oxygène), virgules (symbole du soufre), signe « - » (symbole du sélénium) et signe « + » (symbole du tellure) placés au-dessus du symbole chimique du potassium ou du molybdène.

Aujourd'hui, la virgule est encore utilisée pour rendre compte de la présence de molécules d'eau dans les formules chimiques des sels hydratés (par exemple, « CuSO₄.5H₂O »), même si le recours au point, voire au point médian, est devenu majoritaire. Elle est aussi employée dans des écritures symboliques spécifiques comme la formule chimique du topaze « Al₂SiO₄(F,OH)₂ ». Dans ce cas, la virgule indique que l'on ne connaît pas précisément le ratio

entre l'ion fluorure et l'ion hydroxyde, tout en garantissant que la somme de leurs contributions vaut 2 dans la formule chimique³⁰.

3.5.4. Apparition des représentations de la structure des molécules

Le développement exceptionnel de la chimie organique dans le courant du XIX^{ème} siècle eut deux conséquences majeures sur les notations chimiques. La première est l'avènement d'un nouveau système sémiotique : les représentations iconiques qui mettent en avant l'arrangement spatial des atomes dans une molécule. Ce « retour à l'icône » (Edeline, 2009) est motivé en grande partie par l'incapacité du système de Berzelius à distinguer les isomères. Comme l'écrit Dagognet (1969), la langue symbolique des chimistes est performante pour représenter les corps distincts mais elle est inefficace pour distinguer les corps « presque-égaux ». De plus, comme l'arrangement spatial des atomes dans une molécule joue un rôle prépondérant dans les propriétés réactionnelles des substances, il devient nécessaire de caractériser avec précision les liaisons interatomiques et les angles de liaison. Sous l'impulsion de Couper et Kekulé qui postulent l'existence de liaisons entre atomes de carbone, Loschmidt (1861) propose des représentations de molécules faites de cercles emboîtés et présentant des liaisons simples, doubles ou triples entre atomes de carbone (figure 19).

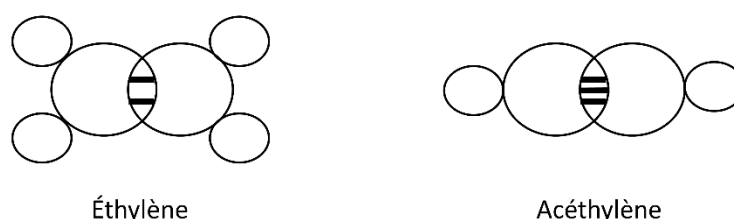


Figure 19. Représentations moléculaires de Loschmidt (1861).

En 1864, les formules de Crum Brown font apparaître les liens chimiques par des traits discontinus. La « formule développée » est née. Elle donnera lieu en une trentaine d'années à de nombreuses versions et modifications de perspective : formule semi-développée plane, projection de Fischer, formule de Haworth, etc.

Néanmoins, Liu et Taber (2016) soulignent que l'amélioration de la représentation de la structure coûte en capacité de traitement quantitatif. Ils en concluent : « As none of these representations is able to afford the whole set of meanings invoked in teaching, they need to be co-deployed to functionally complement each other³¹ » (Liu et Taber, 2016, p. 447).

Ce « co-déploiement » de systèmes sémiotiques différents est une caractéristique intrinsèque à la chimie qui trouve manifestement sa source dans les cours tortueux de son histoire d'un point de vue épistémologique.

³⁰ Notons enfin que Berthelot propose une équation avec un signe « - » en 1856 et qu'il ajoute les mentions symboliques indiquant les états de la matière (en toutes lettres) dès 1865 (de Menten, 2013).

³¹ « Comme aucune des représentations n'est capable d'offrir la totalité des significations invoquées dans l'enseignement, elles doivent être co-déployées pour se compléter les unes les autres de manière fonctionnelle » (traduction libre).

3.5.5. Apparition des flèches de réaction

Une deuxième grande conséquence de l'avènement de la chimie organique consiste en l'apparition de nombreuses flèches de réaction différentes³², qui vont petit à petit remplacer le signe « = » initial issu des travaux de Lavoisier. Le développement de la thermodynamique au cours de la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle va donner lieu à la création de nouvelles flèches adaptées aux nouveaux concepts élaborés. Ainsi, vers 1884, Van't Hoff introduit le symbole de la double flèche à double pointe (\rightleftharpoons) pour représenter l'équilibre chimique. Dix ans auparavant, en 1874, Hinrichs avait introduit le symbole de la flèche pleine à double pointe (\rightarrow), sans qu'elle ne soit utilisée avant 1900 par d'autres chimistes. Enfin, la double flèche à simple pointe (\Rightarrow) est proposée par Hugh Marshall en 1902. Alvarez (2012) a dénombré les livres utilisant les différents signes et flèches, de 1800 à la moitié du XX^{ème} siècle (figure 20). On remarque la chute de l'utilisation du signe « = » à partir des années 1920 et la coexistence de la simple flèche à double pointe et de la double flèche à double pointe au cours du XX^{ème} siècle.

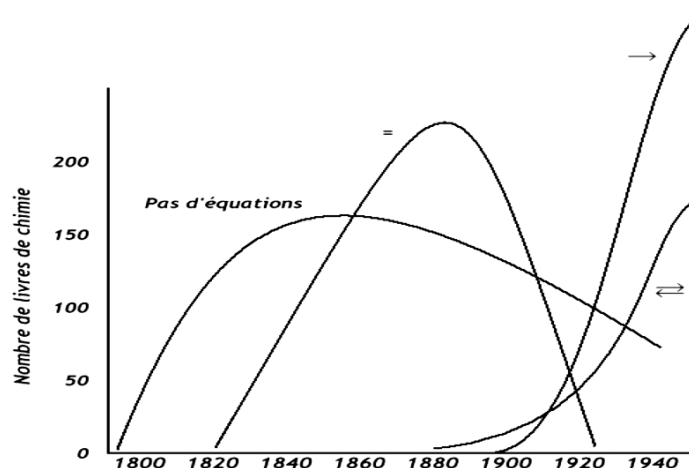


Figure 20. Évolution du nombre de livres présentant des équations chimiques et certains signes (« = », flèche simple, double flèche, etc.) (Bataille *et al.*, 2015, d'après Alvarez, 2012).

Ce constat a été confirmé par Bataille *et al.* (2015), montrant que la majorité des ouvrages de chimie actuels contiennent à la fois des simples flèches et des doubles flèches, souvent utilisées à bon escient. Par contre, ces ouvrages ne présentent pratiquement jamais de signe « = » dans les équations chimiques publiées. Nous ne prenons pas en considération ici les flèches qui décrivent les mécanismes réactionnels en chimie organique, même si leur étude d'un point de vue didactique nous semble légitime et importante. Le passage du signe « = » à une flèche de réaction est un moment important de l'histoire de la notation symbolique en chimie, car il impose un décalage inédit avec les mathématiques.

³² Pour en savoir plus sur les flèches utilisées en chimie, lire Lakshminarayanan (2010), Alvarez (2012) ou Foulon et Bataille (2016).

3.5.6. De la molécule au réseau ionique

La découverte de l'absence de molécules de NaCl dans la substance « chlorure de sodium » constitue également un nœud dans l'histoire de la chimie. La problématique est enclenchée par Arrhenius, malgré lui, quand il postule en 1884 que « salt molecules are found in solid salts as the smallest particles and decompose into ions by dissolving in water³³ » (Barke *et al.*, 2009). En 1912, Laue découvre, via l'utilisation des rayons X, que le terme « molécule de sel » n'est pas adapté pour décrire les réseaux ioniques mis au jour. À partir de là, il fut ardu d'imposer à la communauté scientifique le fait que le cristal de chlorure de sodium ne contienne pas de molécules de chlorure de sodium (c'est-à-dire un atome de chlore lié à un atome de sodium), mais présente un arrangement d'ions sodium et d'ions chlorures respectant une structure cubique à faces centrées. Bragg témoigne de la résistance de certains de ses collègues quant à abandonner l'idée d'une molécule de NaCl : « Some chemists at that time were very upset indeed about this discovery and begged me to see that there was just a slight resemblance of one atom of sodium to one of chlorine as a properly married pair³⁴ » (Bragg, 1943). Il est intéressant de noter qu'aujourd'hui encore, l'expression « molécule de NaCl » reste très populaire, notamment dans les magazines scientifiques, les manuels scolaires ou les sites internet (Barke *et al.*, 2009).

3.5.7. Désubstantialisation du symbole chimique

Nous ne pouvons terminer ce panorama historique sans évoquer les percées de Gaudin et Avogadro en ce qui concerne la distinction entre atomes et molécules, ainsi que celles de Mendeleïev pour la distinction entre corps simple et élément (Laugier et Dumon, 2004). La clarification des concepts d'atome et de molécule a permis l'installation définitive des équations chimiques et leur pleine exploitation par les chimistes du XX^{ème} siècle. Enfin, le concept d'élément défini par Mendeleïev a considérablement modifié le sens donné à un symbole chimique : celui-ci n'est plus seulement représentatif d'une substance ou d'un atome particulier, il devient également le symbole d'une catégorie virtuelle plus large qui entre en résonance avec le tableau périodique. Cette désubstantialisation du symbole chimique peut être vue comme un aboutissement du système initial de Berzelius, où le symbole est initialement une boîte noire, adaptable à toutes transformations graphiques.

³³ « Les molécules de sel se trouvent dans les sels solides, dont elles constituent les plus petites particules, et elles se décomposent en ions en se dissolvant dans l'eau » (traduction libre).

³⁴ « Certains chimistes de cette époque étaient en fait très fâchés de cette découverte et me demandèrent de voir s'il n'y avait pas quelque chose qui ressemble un peu à une paire associant un atome de sodium et un atome de chlore » (traduction libre).

3.6. La notation symbolique aujourd'hui

Dans *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* (IUPAC, 2007), une équipe d'auteurs de l'IUPAC proposent quatre symboles différents dont ils cadrent l'usage dans une équation de réaction (figure 21) :

Niveau MICROSCOPIQUE	
$H + Br_2 \rightarrow HBr + Br$	Une étape élémentaire dans la formation de HBr
$H_2 + Br_2 = 2 HBr$	Ensemble de réactions élémentaires
Niveau MACROSCOPIQUE	
$H_2 + Br_2 = 2 HBr$	Équation stœchiométrique
$H_2 + Br_2 \rightarrow 2 HBr$	Réaction dans une seule direction
$H_2 + Br_2 \rightleftharpoons 2 HBr$	Réaction dans deux directions – réaction réversible
$H_2 + Br_2 \rightleftharpoons 2 HBr$	Réaction menant à un état d'équilibre

Figure 21. Usage et signification des flèches de réaction et du signe « = » (d'après IUPAC, 2007)

- (1) Le signe « = » est ainsi toléré, soit pour décrire « la somme de plusieurs réactions élémentaires » (associée au niveau microscopique), soit pour décrire une « équation stœchiométrique » (associée au niveau macroscopique) rendant uniquement compte de la pondération correcte de l'équation.
- (2) La flèche à double pointe (\rightarrow) est réservée pour décrire une réaction élémentaire ou une réaction s'opérant dans une seule direction, respectivement aux niveaux microscopique et macroscopique.
- (3) La double flèche à doubles pointes (\rightleftharpoons) sert à représenter une réaction réversible au niveau macroscopique, c'est-à-dire qui peut s'opérer dans les deux directions.
- (4) La double flèche à simples pointes (\rightleftharpoons) représente une réaction chimique qui atteint un état d'équilibre, au niveau macroscopique.

Selon IUPAC, le signe « = » peut donc être utilisé dans le cas simple d'une équation chimique pondérée. Si l'intention de l'auteur est de montrer la conservation de la masse, alors le signe « = » s'impose. A contrario, s'il souhaite indiquer que la réaction est incomplète, le symbole « \rightleftharpoons » est le plus pertinent. Ainsi, face à un éventail de possibilités graphiques, qui sont les produits de l'histoire de sa discipline, le chimiste doit choisir en connaissance de cause quelle représentation sert le mieux ses projets.

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Le cours de l'évolution de la symbolique chimique s'avère donc tortueux, serpentant entre les contraintes techniques et théoriques, les tensions politiques, les rivalités personnelles et les compromis de façade. Il apparaît cependant que le temps fait son office et lisse la pierre rugueuse, offrant – par érosion – l'impression d'une pierre polie et sans défauts. Dagognet (1969, p. 86) avait saisi pleinement ce phénomène en précisant que, comme « les traités s'efforcent d'effacer les guerres autant que de les en empêcher », la symbolique chimique actuelle cache les circonvolutions de l'histoire et constitue un point de consensus qui empêche (pour un temps) les digressions. La symbolique chimique suggère bien du « non-dit » (Barlet et Plouin, 1994), mais ce contenu caché est riche : une formule chimique rend compte autant de signifiés contemporains qu'elle ne témoigne, en creux, des décisions et des discussions qui ont amené à sa réalisation. Nous pouvons, parmi d'autres axes d'analyse, mettre en avant deux processus importants.

D'une part, on peut remarquer que l'histoire de la chimie est marquée par deux mécanismes en parallèle. Le symbole chimique est d'abord désubstantialisé par Dalton, puis par Berzelius afin d'en faire un véritable « outil de papier ». En même temps que le symbole chimique est désubstantialisé, des éléments de mathématisation de l'équation chimique sont ajoutés (signe « + », signe « = », terme « équation »), ce qui renforce un peu plus la distance avec les substances. Ensuite, on observe une « resubstantialisation » progressive du symbole chimique, par la mise en œuvre des représentations iconiques microscopiques, produites par les avancées technologiques (cristallographie, modèles quantiques, microscopie à force atomique, etc.). Cette concrétisation du symbole est conjuguée à une « démathématisation » de la symbolique chimique : ajout des flèches de réaction, débat sur la pertinence du terme « équation », etc. L'évolution actuelle de la symbolique chimique (IUPAC, 2007) tend vers la recherche d'un équilibre. La concrétisation de la symbolique chimique doit être réalisée tout en assurant le traitement de problèmes quantitatifs ne nécessitant pas forcément de concrétisation des symboles. La proposition de l'IUPAC (figure 21) nous semble aller dans ce sens.

D'autre part, de nombreuses informations, de prime abord essentielles dans l'élaboration de la symbolique chimique, sont perdues : le coefficient comme un volume de substance ; le symbole chimique lié au nom en latin ; l'importance du signe « = » dans les premières représentations symboliques ; l'omniprésence de l'idée de dualité, d'une (électro)affinité « élective » entre substances. Plus généralement, les débats et les hésitations légitimes ont été gommés. Les places différentes occupées dans l'histoire par l'indice et le coefficient sont des bons exemples des scientifiques au travail, en recherche de la meilleure représentation possible en regard des modèles dominants de l'époque. Si le prix de l'efficacité d'une représentation est d'effacer les licences au profit de règles bien claires, il nous semble que ces règles ne sont réellement comprises par les locuteurs que si leur épistémologie est clarifiée. Ainsi, il appartient à tout chercheur chimiste, et plus encore à tout enseignant de chimie, de se rendre compte de la charge sémantique que véhiculent les signes de la symbolique chimique, car ils sont les reflets de ce qu'est fondamentalement la chimie : une science en perpétuelle mutation.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALVAREZ S. (2012) Chemistry: a panoply of arrows, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, n°3, p. 590-600.
- BARKE H.-D., HAZARI A. & YITBAREK S. (2009). Misconceptions in chemistry. Berlin : Springer-Verlag.
- BATAILLE X., MAUHORAT M.-B. & VIGNERON M. (2015). Du « bon usage » de la flèche come symbole de la transformation chimique. *L'Actualité chimique*, n°399, p. 44-49.
- BEGUIN J. (1615). *Tyrocinium Chymicum (Les Elemens de chymie)*. France : Paris.
- BENSAUDE-VINCENT B. & STENGERS I. (1995). *Histoire de la chimie*. Paris : La Découverte.
- BERGMAN T. (1785). *A dissertation on elective attraction*. London : Murray. Traduction de l'édition originale de 1775.
- BERZELIUS J.J. (1813-1814). Essay on the Cause of Chemical Proportions, and on Some Circumstances Relating to Them: Together with a Short and Easy Method of Expressing Them. *Annals of philosophy*, n° 2, p. 443-454.
- BERZELIUS J.J. (1818-1819). *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*. Paris : Méquignon-Marvis.
- BERZELIUS J. J. (1828). Bestandtheile der Galle In *Jahres-Bericht Über die Fortschritte der Physischen Wissenschaften*, 2^{edn}, 7th volume. Tübingen : Heinrich Laupp.
- BERZELIUS J.J. (1833). Betrachtungen über die Zusammensetzung der organischen Atome, *Anales de physique et de chimie*, n°28, p. 617-630.
- BERZELIUS J.J. (1838). *Traité de chimie (volume 2)*. Belgique : Bruxelles.
- BIDLAKE J.P. (1858). *Bidlake's Elementary Chemistry: a Text-book of Elementary Chemistry for the Use of Schools and Junior Students*. London: Allman and Son.
- BRAGG L. (1943). *The history of X-ray analysis*. London : Langmans.
- BROWN A.C. (1864). On the Theory of Isomeric compounds. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, n°23, p.707-720.
- BRUNOLD C. (1930). *Le problème de l'affinité chimique et l'atomistique*. Paris : Masson.
- CONDILLAC E.B. (1877). *La langue des calculs, ouvrage posthume et élémentaire imprimé sur les manuscrits autographes de l'auteur*, Librairie Sandoz et Fischbacher, Saint-Denis : Brochin, p. 152. 1^{ère} édition, Paris : Charles Houel, 1798, p. 228.
- CROSLAND M.P. (1959). The use of diagrams as "chemical equations" in the lecture notes of William Cullen and Joseph Black. *Annals of science*, vol. 15, n°2, p. 75-90.
- DAGOGNET F. (1969). *Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation*. Paris : Seuil.
- DALTON J. (1808). *A New System of Chemical Philosophy*, 2 vols: vol. 1, part 1. Manchester : S. Russell ; part 2, Manchester : Russell & Allen, 1810; vol. 2, Manchester : Executors of S. Russell, 1827.
- DEHON J. (2018). *L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge* (mémoire de thèse). Namur : PUN.
- DUBOIS J., GIACOMO M., GUESPIN L., MARCELLESI C., MARCELLISI J.-B. & MÉVEL J.-P. (2012). *Le dictionnaire de linguistique et des sciences du langage*. Paris : Larousse.
- DUMAS J.-B. A. & BOULLAY P. (1827). Mémoire sur la Formation de l'Ether sulfurique, *Annales de Chimie et de Physique*, n°36, p. 294-310.
- ECO U. (1988). *Le signe*. Bruxelles : Éditions Labor.
- EDELINE F. (2009). Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques : ou de l'icône au symbole et retour. *Protée*, vol. 37, n° 3, p. 45-66.

- FABBRIZZI L. (2008). Communicating about matter with symbols : evolving from alchemy to chemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 85, n° 11, p. 1501-1511.
- FOULON, J.-P. & BATAILLE, X. (2016). Les flèches ont-elles du sens ? *l'Actualité chimique*, n°404, p. 34-37.
- FOWNES G.A. (1847) *Manual of Elementary Chemistry, Theoretical and Practical*, 7th ed.; Philadelphia : Blanchard and Lee.
- GEOFFROY, E.F. (1718). Table des différents rapports observés en Chimie entre différentes substances in *Abrégé de l'histoire et des mémoires de l'académie royale des sciences*, 1770, Guenau de Montbeliard, Tome I, Paris.
- GERHARDT C. (1853). *Recherche sur les acides organiques anhydres*. Annales de chimie et de physique, vol. 3, n° 37, p. 285-342.
- GUYTON de MORVEAU L.-B., LAVOISIER A.-L., BERTHOLLET, C. & de FOURCROY A. F. (1787). *Méthode de nomenclature chimique*. Paris : Cuchet.
- HINRICHS G. (1874). *The principles of chemistry and molecular mechanics*, 3 vol., New York : Westermann et co.
- IUPAC (Collectif) (2007). *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry*, 3rd ed., IUPAC-RSC Publishing, www.iupac.org/fileadmin/user_upload/publications/e-resources/ONLINE-IUPAC-GB3-2ndPrinting-Online-Sep2012.pdf, consulté le 21 juin 2017.
- JENSEN W.B. (2005). The symbolism of chemical equations. *Journal of Chemical Education*, vol. 82, n° 10, p. 1461.
- KLEIN U. (2001). The creative power of paper tools in early nineteenth century chemistry in *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*, U. Klein (Ed.). Dordrecht : Kluwer academic Publishers.
- KLEIN U. (2002). Berzelian formulas as paper tools in early nineteenth-century chemistry. *Foundations of chemistry*, vol. 3, 2001, p. 7-32.
- KNIGHT D. (2003). Exalting understanding without depressing imagination. *HYLE*, vol. 9, n° 2, p. 171-189.
- LAKSHMINARAYANAN A., Arrows in chemistry, *Resonance*, Journal of Science Education, Indian Academy of Sciences, p. 51-63.
- LASZLO P. (1993). *La parole des choses*. Paris : Hermann, éditeur des sciences et des arts.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2004). L'équation de réaction : un nœud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, n°5, p. 51-68.
- LAURENT A. (1848). *Sur la chlorocyanilide et quelques autre anilides*. Annales de chimie et de physique, vol. 3, n° 22, p. 97-116.
- LAVOISIER A.-L. (1782). Considérations générales sur la dissolution des métaux dans les acides in *Mémoires de l'Académie des sciences*, année 1782.
- LAVOISIER A.-L. (1789). *Traité élémentaire de chimie*. Cuchet Librairie, Paris, reproduction de l'édition originale, Culture et Civilisation, Bruxelles, 1965, Librairie Blanchard, Paris.
- LEE A. (1833) *Chemical Diagrams, Accompanied by a Concise Description of Each Decomposition*. Londres : Cox.
- LIEBIG J. (1834). Ueber die Constitution des Aethers und seiner Verbindungen, *Annales de Pharmacie*, n° 9, p. 1-39.
- LIU Y. & TABER K.S. (2016). Analysing symbolic expressions in secondary school chemistry: their functions and implications for pedagogy. *Chemistry Education : Research and Practice*, n°17, p. 439-451.
- LOSCHMIDT J. (1861). *Chemische Studien I*. Vienna : Carl Gerold's Sohn.
- MARKIC S. & CHILDS P. (2016). Language and the teaching and learning of chemistry. *Chemistry Education : Research and Practice*, n° 17, p. 434-438.

- MARSHALL H. (1902). Vorschlag, Betreffend den Gebrauch Modifizierter Gleichheitszeichen in der Chemischen Zeichensprache (« Proposition relative à l'utilisation du signe égal modifié dans la langue des signes chimiques »), *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1902, vol. 41, n°1, p. 103-107.
- MENTEN (de) P. (2013). *Dictionnaire de chimie*. Louvain-La-Neuve : De Boeck.
- PRIÉTO L. J. (1968). La sémiologie. Dans *Le langage*, La Pléiade, Paris : Gallimard, p. 93-144.
- THÉNARD L. J. (1827). *Traité de Chimie élémentaire, théorique et pratique*, 5^{ème} édition, vol.II, Paris : Crochard.
- THIMS L. (2007). *Human Chemistry (volume two)*. USA : Morrisville.
- VANT'HOF M.J.H. (1884). *Étude de dynamique chimique*. Amsterdam : Muller.